

Experimento 9

SUPERFLUIDEZ DO HÉLIO

Introdução

Um dos problemas experimentais importantes em criogenia é a medida de temperaturas. No intervalo 300 a 4,2 K, vários termômetros são utilizados, como, por exemplo, resistores de vidro de carbono (carbon-glass), resistores de platina (usualmente para temperaturas acima de 30 K), termopares de cromel-alumel (tipo K, para temperaturas acima de 77 K), termopares (Fe-Au)-cromel (para todo o intervalo citado) e diodos de AsGa, entre outros. Em geral, a sensibilidade de todos esses termômetros diminui drasticamente à medida que nos aproximamos da temperatura do Hélio líquido (LHe). Se quisermos trabalhar abaixo de 4,2 K, como freqüentemente acontece, precisamos lançar mão de termômetros apropriados, que apresentem alta variação de suas propriedades termométricas com pequenas variações de temperatura, em temperaturas tão baixas. Um termômetro que satisfaz essa exigência é o de resistor de filme de carbono, que pode apresentar alta sensibilidade, dependendo de seu processo de fabricação.

Normalmente, obtemos temperaturas abaixo da ambiente e até 4,2 K utilizando LN2 e LHe em um criostato ou dewar, e um variador de temperatura, normalmente um suporte de amostra com um aquecedor e um termômetro, acoplados a um controlador de temperatura. Por exemplo, em nosso laboratório usamos um criostato óptico chamado Varitemp, exatamente porque permite a variação controlada da temperatura da amostra. Quando queremos temperaturas abaixo de 4,2 K, a maneira mais fácil é usar a propriedade de que a temperatura de ebulição de um líquido depende da pressão a que ele está submetido. Em geral, abaixando-se a pressão abaixamos também a temperatura de ebulição. Isso pode ser usado no caso do LHe. A dependência da temperatura de ebulição do LHe com a pressão de vapor foi determinada experimentalmente e é dada na tabela I em anexo.

Como sabemos, quando abaixamos a temperatura do LHe, ele sofre uma transição de fase a 2,17 K e 37,80 mmHg para uma fase superfluida, em que a condutividade térmica do fluido é muito alta e sua viscosidade é zero. Nessas condições, o LHe, que normalmente mostra muitas bolhas, deixa de fazê-lo, pois todo o calor é conduzido imediatamente para as paredes do recipiente que contém o LHe, eliminando as bolhas. A evaporação do He superfluido se dá ao longo das paredes do recipiente que o contém, pois ele forma um filme que "escala" essas paredes até encontrar uma região de temperatura alta o suficiente para evaporar. O desaparecimento brusco das bolhas de evaporação permitem a observação visual da transição normal-superfluido.

Neste experimento temos como objetivo observar a transição de fase normal- superfluido para o He e, aproveitando o aparato para bombeamento do LHe, temos como segundo objetivo variar lentamente a pressão de vapor do LHe e calibrar um resistor de carbono como termômetro no intervalo de 4,2 a- 1,8 K. Também observaremos o efeito "Meissner" em supercondutores

Aparato Experimental

Nosso equipamento de medida (ver experimento anterior) é relativamente complexo e deve ser manipulado com muito cuidado, sempre com a assistência do professor ou do auxiliar.

Em particular, nunca faça uma ação se você está inseguro a respeito dos efeitos dela. Siga sempre a regra: na dúvida, não faça, pergunte. O aparato que vamos usar consiste de um criostato de pesquisa óptico tipo Varitemp, com a câmara de LHe ligada à câmara de amostra através de um capilar controlado por uma válvula agulha. Esse criostato está ligado a um sistema de alto vácuo, para o isolamento térmico das suas diversas câmaras; está ligado também a uma "árvore" de válvulas que o conecta à linha de recuperação de He. No nosso caso, essa árvore está também ligada a uma possante bomba mecânica, de alta vazão, que é usada para bombear o LHe, e a um manômetro em U de mercúrio, que permite medir a pressão de vapor do LHe em relação à pressão atmosférica, que em Campinas pode ser tomada como 715 mmHg. As válvulas estão dispostas de modo que se pode isolar a câmara de amostra do Varitemp da linha de recuperação de He e conectá-la à bomba mecânica, de modo a abaixar a pressão de vapor do LHe. Uma válvula agulha permite a regulagem fina do bombeamento.

Procedimento

a) Superfluidez

Em primeiro lugar observaremos a transição normal-superfluido. Para isso, faremos a transferência de LHe. Em seguida, a câmara de He será pressurizada, fechando-se a válvula que a liga à linha de recuperação de He, e encheremos a câmara de amostra com LHe. Esse He poderá ser observado através da janela óptica. Quando essa câmara estiver cheia, a câmara de He será despressurizada, e a câmara de amostra será bombeada. Os alunos deverão observar a janela óptica, iluminando-a com uma lanterna, para poder enxergar o momento da transição de fase.

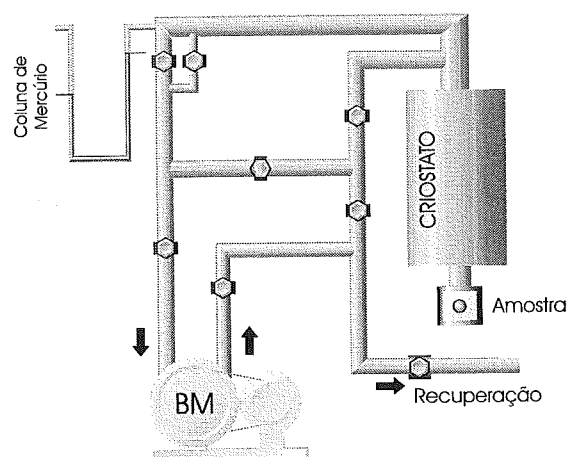


Figura 1: Montagem Experimental.

b) Taxa de evaporação de hélio líquido

Neste experimento o grupo deverá medir também a taxa de evaporação de hélio. Após o preenchimento da camisa de nitrogênio e da transferência de hélio, meça o nível do hélio usando o provador, que é um tubo fino de aço inox que termina em uma peça cônica fechada com uma membrana de borracha, e que vibra em consonância com vibrações termo-acústicas típicas de hélio líquido gasoso em temperaturas muito próximo à de ebulição (leia artigo em anexo). Como o gás tem frequência dessas oscilações termo-acústicas diferente da do hélio, esse dispositivo simples permite medir o nível de hélio dentro do criostato. Deve-se então construir uma tabela de altura do líquido em função do tempo. O criostato deve ser medido, de modo que se tenham as suas dimensões importantes. Em seguida, deve-se fazer uma estimativa dos diversos fluxos de calor pelos diferentes mecanismos, e com essa estimativa, deve-se estimar qual é a taxa de evaporação esperada, e comparar com a taxa medida experimentalmente. Veja o experimento sobre o criostato e compare os dois resultados.

b) Medida de supercondutividade do nióbio

Realize medidas da resistência do nióbio (supercondutor tipo I) em função da temperatura. Um fio de nióbio está colocado dentro do criostato com quatro contatos elétricos para medida de resistência utilizando o método de quatro pontas. Veja o experimento de supercondutividade para adotar como roteiro para estas medidas. Faça as medidas na maior faixa de temperatura possível, pelo menos entre 4 e 100 K. Faça o gráfico da resistência em função da temperatura e determine a inclinação da curva na transição e compare o resultado com o valor obtido com a cerâmica do experimento de supercondutividade usando YBaCuO (supercondutor tipo II).

Literatura: *Cryogenics, Michael McClintock*
Advanced Cryogenics, C. A. Bailey
Cryogenics Fundamentals, G. G. Haselden
Cryogenics – Research and Applications, Marshall Sittig
Artigo: J. Gaffney and J.R. Clement, "Liquid Helium Level-finder", Review of Scientific Instruments, 26 (6) 620 (1955)

RELATÓRIO

Resumo

I – Introdução – Destaque os objetivos e a motivação para o estudo do experimento

II – Descrição do procedimento – descreva detalhadamente como o experimento foi realizado. Descreva o dispositivo e o procedimento usado para a medida do nível do Hélio usando o efeito thermo-acústico.

III - Resultados – descreva os resultados obtidos.

IV - Discussão

- a) Discuta os resultados obtidos e descreva as características básicas de Hélio superfluido.
- b) Descreva os procedimentos convencionais para se obter temperaturas baixas para várias faixas, desde pequenos valores, como em geladeiras domésticas, até temperaturas da ordem de mK, usando desmagnetização isentrópica (que utiliza variações na entropia).
- c) Faça uma estimativa teórica da taxa de evaporação e compare com as medidas experimentais. Explique as origens das diferenças obtidas. Justifique as aproximações usadas. Utilize as equações constantes da apostilha de criogenia. O criostato deve ser medido, de modo que se tenham todas as suas dimensões importantes para este cálculo. Compare o resultado deste experimento com hélio do experimento realizado com nitrogênio.
- d) Compare as curvas de resistência do nióbio (supercondutor tipo I) com a do YBaCuO (supercondutor tipo II – ver experimento sobre supercondutividade). Explique as principais diferenças entre estes dois tipos de supercondutores.

V – Conclusão

Referências

Tabela adicional

Pressão de Vapor – Temperatura do Hélio

P (mmHg)	³ He (K)	⁴ He (K)			
800	3,2395	4,2700	100	1,7881	2,6354
780	3,2152	4,2427	90	1,7387	2,5781
760	3,1905	4,2150	80	1,6856	2,5163
740	3,1653	4,1868	70	1,6279	2,4489
720	3,1396	4,1580	60	1,5646	2,3745
700	3,1134	4,1287	50	1,4939	2,2911
680	3,0866	4,0989	45	1,4550	2,2450
660	3,0594	4,0684	40	1,4131	2,1952*
640	3,0315	4,0373	35	1,3676	2,1413
620	3,0030	4,0056	30	1,3176	2,0827
600	2,9739	3,9731	25	1,2617	2,0174
580	2,9441	3,9399	20	1,1978	1,9427
560	2,9136	3,9059	18	1,1692	1,9092
540	2,8824	3,8711	16	1,1384	1,8729
520	2,8504	3,8354	14	1,1049	1,8333
500	2,8175	3,7987	12	1,0679	1,7893
480	2,7838	3,7611	10	1,0266	1,7396
460	2,7491	3,7224	9	1,0038	1,7120
440	2,7133	3,6825	8	0,9791	1,6820
420	2,6765	3,6414	7	0,9523	1,6490
400	2,6385	3,5990	6	0,9227	1,6123
380	2,5992	3,5551	5	0,8894	1,5707
360	2,5586	3,5097	4	0,8512	1,5221
340	2,5164	3,4625	3,5	0,8295	1,4943
320	2,4726	3,4134	3	0,8055	1,4632
300	2,4269	3,3622	2,5	0,7785	1,4277
290	2,4033	3,3357	2	0,7474	1,3863
280	2,3792	3,3086	1,5	0,7101	1,3359
270	2,3545	3,2808	1	0,6624	1,2699
260	2,3292	3,2524	0,9	0,6508	1,2536
250	2,0333	3,2231	0,8	0,6383	1,2359
240	2,2767	3,1931	0,7	0,6246	1,2162
230	2,2493	3,1622	0,6	0,6093	1,1942
220	2,2212	3,1304	0,5	0,5920	1,1691
210	2,1922	3,0976	0,4	0,5720	1,1395
200	2,1623	3,0637	0,3	0,5477	1,1032
190	2,1314	3,0287	0,2	0,5163	1,0554
180	2,0994	2,9924	0,1	0,4693	0,9814
170	2,0663	2,9546	0,08	0,4556	0,9595
160	2,0319	2,9153	0,06	0,4391	0,9325
150	1,9959	2,8744	0,04	0,4174	0,8967
140	1,9585	2,8315	0,02	0,3844	0,8407
130	1,9192	2,7865	0,01	0,3557	0,7907
120	1,8779	2,7390	0,005	0,3305	
110	1,8343	2,6888	0,001	0,2829	

* - Transição do He^I para He^{II} em
T = 2,1720K
P = 37,80mm Hg

Review of Scientific Instruments 26(6) 620 (1955)

Liquid Helium Level-Finder

JOHN GAFFNEY AND J. R. CLEMENT
 United States Naval Research Laboratory, Washington 25, D. C.
 (Received March 22, 1955)

It has been known for some time¹ that spontaneous oscillations may occur in a gas-filled tube inserted in a liquid helium cryostat, especially when the end of the tube remaining at room

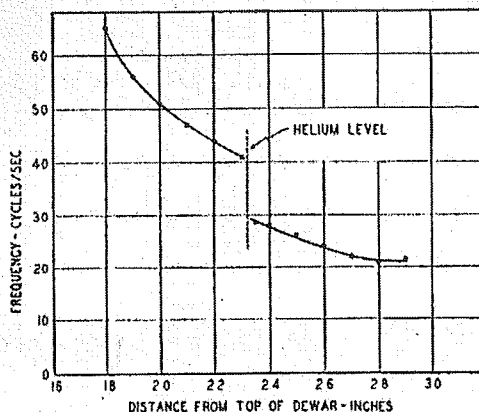


FIG. 1. Frequency of oscillation vs position of cold end for a $\frac{1}{8}$ in. o.d. tube oscillating in a 25-liter storage Dewar.

temperature is closed. Some experiments were carried out in this Laboratory in an effort to obtain more quantitative data concerning this phenomenon.² During the course of these experiments abrupt changes in at least two properties of the oscillations were observed to occur when the cold end of the tube crossed the liquid-vapor boundary. Specifically, when the cold end of a tube containing an oscillating gas column passes from the vapor into the liquid, the frequency of the oscillation decreases about 30 percent, and the intensity of the oscillation decreases about 60 percent. An accurate and extremely simple level finder³ has been developed which depends on one or both of these abrupt changes for its operation.

For convenience, experiments were performed in a commercially available metal storage Dewar. The body of this Dewar is a sphere about $11\frac{1}{2}$ in. in diameter, and it has a filling neck approximately $18\frac{1}{2}$ in. long and $\frac{1}{8}$ in. o.d. When an Inconel tube was inserted in this Dewar, the enclosed gas column began to oscillate when the lower end was approaching the bottom of the filling tube. Figure 1 shows, from that point downward, the course of frequency vs length of tube inserted in the Dewar.

The problem of constructing a level finder which would utilize these effects, yet remain portable and simple to operate, was solved by placing a thin rubber membrane over a machined brass reducer and attaching the reducer to one end of the tube containing the oscillating gas column. A typical construction is illustrated in Fig. 2. The liquid helium level may be easily found by holding the thumb or forefinger over the rubber membrane and noting the point at which the abrupt frequency-intensity change occurs. The reducer at the top of the tube increases the area of contact between the finger and the oscillating gas. With care, helium levels can be measured to within ± 1 mm.

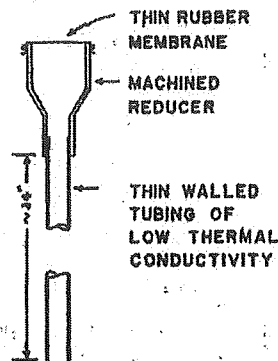


FIG. 2. Sketch of the level finder.

For the tubing containing the oscillating gas column, we have found that $\frac{1}{8}$ in. o.d. thin-walled (0.008-in.) Inconel works very well. If a much smaller diameter tube is used, air may freeze inside the tube, stopping the oscillations. If much larger diameter tubes are used, the oscillations may become so intense that the liquid surface is disturbed, causing the level to become uncertain. Small sections cut from surgical gloves make rugged and sufficiently sensitive membranes. Thinner membranes give greater sensitivity, but may occasionally be broken by intense oscillations. Since these spontaneous oscillations also occur in tubes inserted in liquid hydrogen Dewars, this level finder may be used for measuring liquid hydrogen levels.

¹ W. H. Keesom, *Helium* (Elsevier Publishing Company, Houston, Texas, 1942), p. 174.

² J. R. Clement and J. Gaffney, Proceedings of the 1954 Cryogenics Engineering Conference, NBS report 3517, February 1955, pp. 227-231.

³ For a bibliography of level finders, see W. T. Kitts and F. L. Harler, *Rev. Sci. Instr.* 25, 926 (1954).

TABLE 66—Continued.

T, K	E ₀ , μV	S, μV/K	dS/dT, μV/K ²	T, K	E ₀ , μV	S, μV/K	dS/dT, μV/K ²
190	3485.49	21.307	18.1	235	4467.26	21.881	10.3
191	3497.44	21.315	18.1	236	4481.17	21.891	10.1
192	3509.38	21.324	17.9	237	4495.17	21.901	9.8
193	3521.32	21.334	17.8	238	4509.17	21.911	9.6
194	3533.26	21.344	17.7	239	4523.17	21.921	9.5
195	3545.20	21.354	17.6	240	4537.17	21.931	9.5
196	3557.14	21.364	17.5	241	4551.17	21.941	9.5
197	3569.08	21.374	17.4	242	4565.17	21.951	9.5
198	3581.02	21.384	17.3	243	4579.17	21.961	9.5
199	3592.96	21.394	17.2	244	4593.17	21.971	9.2
200	3604.90	21.404	17.1	245	4607.17	21.981	9.2
201	3616.84	21.414	17.0	246	4621.17	21.991	9.3
202	3628.78	21.424	16.9	247	4635.17	21.998	9.3
203	3640.72	21.434	16.8	248	4649.17	22.005	9.4
204	3652.66	21.444	16.7	249	4663.17	22.012	9.5
205	3664.60	21.454	16.5	250	4677.17	22.019	9.6
206	3676.54	21.464	16.3	251	4691.17	22.026	9.8
207	3688.48	21.474	16.2	252	4705.17	22.033	10.0
208	3700.42	21.484	16.0	253	4719.17	22.040	10.2
209	3712.36	21.494	15.8	254	4733.17	22.047	10.3
210	3724.30	21.504	15.9	255	4747.17	22.054	10.6
211	3736.24	21.514	15.8	256	4761.17	22.061	10.6
212	3748.18	21.524	15.6	257	4775.17	22.068	11.0
213	3760.12	21.534	15.4	258	4789.17	22.075	11.1
214	3772.06	21.544	15.3	259	4803.17	22.082	11.3
215	3784.00	21.554	15.1	260	4817.17	22.089	11.5
216	3795.94	21.564	14.9	261	4831.17	22.096	11.6
217	3807.88	21.574	14.7	262	4845.17	22.103	11.6
218	3819.82	21.584	14.5	263	4859.17	22.110	11.7
219	3831.76	21.594	14.3	264	4873.17	22.117	11.6
220	3843.70	21.604	14.2	265	4887.17	22.124	11.5
221	3855.64	21.614	14.0	266	4901.17	22.131	11.5
222	3867.58	21.624	13.8	267	4915.17	22.138	11.3
223	3879.52	21.634	13.6	268	4929.17	22.145	10.7
224	3891.46	21.644	13.4	269	4943.17	22.152	10.3
225	3903.40	21.654	13.2	270	4957.17	22.159	9.7
226	3915.34	21.664	13.0	271	4971.17	22.166	9.0
227	3927.28	21.674	12.8	272	4985.17	22.173	8.3
228	3939.22	21.684	12.6	273	4999.17	22.180	7.3
229	3951.16	21.694	12.4	274	5013.17	22.187	6.3
230	3963.10	21.704	12.2	275	5027.17	22.194	5.2
231	3975.04	21.714	12.0	276	5041.17	22.201	4.0
232	3986.98	21.724	11.8	277	5055.17	22.208	2.7
233	3998.92	21.734	11.6	278	5069.17	22.215	1.1
234	4010.86	21.744	11.4	279	5083.17	22.222	-0.1
235	4022.80	21.754	11.2	280	5097.17	22.229	-0.9

TABLE 66—Continued.

T, K	E ₀ , μV	S, μV/K	dS/dT, μV/K ²	T, K	E ₀ , μV	S, μV/K	dS/dT, μV/K ²
90	1496.32	18.415	60.1	140	3463.15	20.694	26.5
91	1511.75	18.425	60.1	141	3478.58	20.704	26.5
92	1527.18	18.435	60.2	142	3494.01	20.714	26.5
93	1542.61	18.445	60.3	143	3509.44	20.724	26.5
94	1558.04	18.455	60.4	144	3524.87	20.734	26.5
95	1573.47	18.465	60.5	145	3540.30	20.744	26.5
96	1588.90	18.475	60.6	146	3555.73	20.754	26.5
97	1604.33	18.485	60.7	147	3571.16	20.764	26.5
98	1619.76	18.495	60.8	148	3586.59	20.774	26.5
99	1635.19	18.505	60.9	149	3602.02	20.784	26.5
100	1650.62	18.515	61.0	150	3617.45	20.794	26.5
101	1666.05	18.525	61.1	151	3632.88	20.804	26.5
102	1681.48	18.535	61.2	152	3648.31	20.814	26.5
103	1696.91	18.545	61.3	153	3663.74	20.824	26.5
104	1712.34	18.555	61.4	154	3679.17	20.834	26.5
105	1727.77	18.565	61.5	155	3694.60	20.844	26.5
106	1743.20	18.575	61.6	156	3710.03	20.854	26.5
107	1758.63	18.585	61.7	157	3725.46	20.864	26.5
108	1774.06	18.595	61.8	158	3740.89	20.874	26.5
109	1789.49	18.605	61.9	159	3756.32	20.884	26.5
110	1804.92	18.615	62.0	160	3771.75	20.894	26.5
111	1820.35	18.625	62.1	161	3787.18	20.904	26.5
112	1835.78	18.635	62.2	162	3802.61	20.914	26.5
113	1851.21	18.645	62.3	163	3818.04	20.924	26.5
114	1866.64	18.655	62.4	164	3833.47	20.934	26.5
115	1882.07	18.665	62.5	165	3848.90	20.944	26.5
116	1897.50	18.675	62.6	166	3864.33	20.954	26.5
117	1912.93	18.685	62.7	167	3879.76	20.964	26.5
118	1928.36	18.695	62.8	168	3895.19	20.974	26.5
119	1943.79	18.705	62.9	169	3910.62	20.984	26.5
120	1959.22	18.715	63.0	170	3926.05	20.994	26.5
121	1974.65	18.725	63.1	171	3941.48	21.004	26.5
122	1990.08	18.735	63.2	172	3956.91	21.014	26.5
123	2005.51	18.745	63.3	173	3972.34	21.024	26.5
124	2020.94	18.755	63.4	174	3987.77	21.034	26.5
125	2036.37	18.765	63.5	175	4003.20	21.044	26.5
126	2051.80	18.775	63.6	176	4018.63	21.054	26.5
127	2067.23	18.785	63.7	177	4034.06	21.064	26.5
128	2082.66	18.795	63.8	178	4049.49	21.074	26.5
129	2098.09	18.805	63.9	179	4064.92	21.084	26.5
130	2113.52	18.815	64.0	180	4080.35	21.094	26.5
131	2128.95	18.825	64.1	181	4095.78	21.104	26.5
132	2144.38	18.835	64.2	182	4111.21	21.114	26.5
133	2159.81	18.845	64.3	183	4126.64	21.124	26.5
134	2175.24	18.855	64.4	184	4142.07	21.134	26.5
135	2190.67	18.865	64.5	185	4157.50	21.144	26.5
136	2206.10	18.875	64.6	186	4172.93	21.154	26.5
137	2221.53	18.885	64.7	187	4188.36	21.164	26.5
138	2236.96	18.895	64.8	188	4203.79	21.174	26.5
139	2252.39	18.905	64.9	189	4219.22	21.184	26.5

Procedimento para uso da tabela acima:

- 1) Esta tabela usa como referência a temperatura de zero grau Kelvin (0 K).
- 2) A medida feita em laboratório, V₀ (em mV) usa como referência zero grau Celsius (0°C=273 K), obtido com mistura de água e gelo.
- 3) Assim, a tensão obtida no experimento, V₀, precisa ser adicionada à tensão que seria obtida se a referência fosse 0K, ou seja 5305 μV (ver na tabela acima o valor para 273K). Ou seja, a tensão final V será: V(μV) = V₀(μV) + 3505 μV.

Consultando a tabela acima, obtém-se a temperatura em graus Kelvin.

Exemplo: valor medido=-1453 μV. V=-1453+5305=3854 μV, que corresponde a 207 K = -66 °C

	Pa N/m ²	bar	mbar	μbar dyn/cm ²	Torr mm Hg	micron μ, mTorr	atm	at	mm WS	psi lbf/inch ²	psf lbf/ft ²
Pa	1	1 · 10 ⁻⁵	1 · 10 ⁻²	10	7.5 · 10 ⁻³	7.5	9.87 · 10 ⁻⁶	1.02 · 10 ⁻⁵	0.102	1.45 · 10 ⁻⁴	2.09 · 10 ⁻²
bar	1 · 10 ⁵	1	1 · 10 ³	1 · 10 ⁶	750	7.5 · 10 ⁵	0.987	1.02	1.02 · 10 ⁴	14.5	2.09 · 10 ³
mbar	100	1 · 10 ⁻³	1	1000	0.75	750	9.87 · 10 ⁻⁴	1.02 · 10 ⁻³	10.2	1.45 · 10 ⁻²	2.09
μbar	0.1	1 · 10 ⁻⁶	1 · 10 ⁻³	1	7.5 · 10 ⁻⁴	0.75	9.87 · 10 ⁻⁷	1.02 · 10 ⁻⁶	1.02 · 10 ⁻²	1.45 · 10 ⁻⁵	2.09 · 10 ⁻³
Torr	1.33 · 10 ²	1.33 · 10 ⁻³	1.33	1330	1	1000	1.32 · 10 ⁻³	1.36 · 10 ⁻³	13.6	1.93 · 10 ⁻²	2.78
micron	0.133	1.33 · 10 ⁻⁶	1.33 · 10 ⁻³	1.33	1 · 10 ⁻³	1	1.32 · 10 ⁻⁶	1.36 · 10 ⁻⁶	1.36 · 10 ⁻²	1.93 · 10 ⁻⁵	2.78 · 10 ⁻³
atm	1.01 · 10 ⁵	1.013	1013	1.01 · 10 ⁶	760	7.6 · 10 ⁵	1	1.03	1.03 · 10 ⁴	14.7	2.12 · 10 ³
at	9.81 · 10 ⁴	0.981	981	9.81 · 10 ⁵	735.6	7.36 · 10 ⁵	0.988	1	1 · 10 ⁴	14.2	2.04 · 10 ³
mm WS	9.81	9.81 · 10 ⁻⁵	9.81 · 10 ⁻²	98.1	7.36 · 10 ⁻²	73.6	9.88 · 10 ⁻⁵	1 · 10 ⁻⁴	1	1.42 · 10 ⁻³	0.204
psi	6.89 · 10 ³	6.89 · 10 ⁻²	68.9	6.89 · 10 ⁴	51.71	5.17 · 10 ⁴	6.8 · 10 ⁻²	7.02 · 10 ⁻²	702	1	144
psf	47.8	4.78 · 10 ⁻⁴	0.478	478	0.359	359	4.72 · 10 ⁻⁴	4.87 · 10 ⁻⁴	4.87	6.94 · 10 ⁻³	1

$$N_A = 6,02 \times 10^{23} \text{ /mol}$$

$$k = 1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$$

$$R = 8,31 \text{ J/mol.K}$$

$$PV = nRT$$

$$R = N_A k$$

$$PV = NkT$$

$$N = nN_A$$

Número de Avogadro

Constante de Boltzmann

Constante dos gases